

М. А. Ракк

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ MPLS НА СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Рассмотрены принципы технологии MPLS. На основании математической модели процесса туннелирования, предложенной А. Б. Гольдштейном ([1]), проанализирована эффективность применения технологии при организации туннеля MPLS.

Эффективность организации туннеля MPLS определяется на основании сравнения времени пребывания пакета в LSP-пути с организацией туннеля и LSP-пути без туннеля при различной величине нагрузки сети, приведены результаты расчётов и графики зависимостей. Кроме того, представлен анализ выигрыша во времени при передаче пакета по LSP-туннелю при изменении числа узлов в маршруте и при различных нагрузках сети.

технология MPLS, туннель MPLS, LSP-путь, эффективность применения технологии.

Введение

Структура трафика, передаваемого по сетям связи, за последние годы сильно изменилась. Пакетные сети используются для предоставления услуг передачи речи, прослушивания музыки, просмотра видеоклипов, организации мультимедийной конференц-связи, обеспечения мобильности абонентов, создания сетей IP-телефонии, распределенного моделирования, управления в режиме on-line, сетевых игр и других приложений в реальном времени.

Очевидно, что при использовании пакетных сетей для обслуживания трафика реального времени необходимо гарантировать качество обслуживания (Quality of Service, QoS), создавать средства для того, чтобы в периоды перегрузки IP-сети на трафик реального времени не оказывалось воздействия или, по крайней мере, этот тип трафика получал бы более высокий приоритет перед остальными.

Для обеспечения гарантированного качества обслуживания трафика реального времени были созданы разнообразные механизмы и протоколы, такие как IntServ, DiffServ, RSVP и др. Возрастающий спрос клиентов на организацию виртуальных частных сетей повлек за собой появление различных

технологий, предлагающих данный вид сервиса. В последние несколько лет широкое распространение получила технология многопротокольной коммутации по меткам – MultiProtocol Label Switching (MPLS). Эта технология внедряется как в корпоративных сетях, так и в сетях общего пользования [1–3].

Многопротокольная коммутация по меткам MPLS – это стандарт, разработанный рабочей группой по созданию интегрированных услуг IETF. Это архитектура построения магистральных сетей, которая значительно расширяет имеющиеся перспективы масштабирования, повышает скорость обработки трафика и предоставляет огромные возможности для организации дополнительных услуг. Технология MPLS сочетает в себе возможности управления трафиком, присущие технологиям канального уровня, и масштабируемость и гибкость протоколов, характерные для сетевого уровня.

MPLS – это технология переадресации пакетов, которая использует метки для принятия решений о перенаправлении данных. С помощью MPLS проводится однократный анализ заголовка третьего уровня (при поступлении пакета в домен MPLS). Анализ метки приводит к дальнейшей переадресации пакета.

Основное преимущество технологии MPLS состоит в более высокой степени масштабирования – расширяемости, возможности функционального наращивания системы путем добавления новых элементов или замены устаревших на более совершенные без изменения архитектуры. Таким свойством должна обладать, прежде всего, транспортная сеть. Предпочтительная область применения технологии IP/MPLS – ядро транспортной сети.

Масштабируемость означает экономичную поддержку большого количества пользовательских потоков, а экономичность подразумевает возможность передачи через магистраль многочисленных потоков без слежения за каждым из них, т. е. совокупно за множеством путем их агрегирования.

1 Туннельные передачи в сетях MPLS

Туннелирование (tunneling), или инкапсуляция (encapsulation), – это способ передачи полезной информации через промежуточную сеть. Такой информацией могут быть кадры (или пакеты) другого протокола. При инкапсуляции кадр не передается в сгенерированном узлом-отправителем виде, а снабжается дополнительным заголовком, содержащим информацию о маршруте, позволяющую инкапсулированным пакетам проходить через промежуточную сеть (Internet). На конце туннеля кадры деинкапсулируются и передаются получателю.

Этот процесс (включающий инкапсуляцию и передачу пакетов) и есть туннелирование. Логический путь передвижения инкапсулированных пакетов в транзитной сети называется туннелем.

Туннельные передачи представлены на рис. 1. Все пограничные маршрутизаторы MPLS (LER1, LER2, LER3 и LER4) используют протокол BGP и создают коммутируемый по меткам тракт LSP между ними (LSP1). Эти четыре пограничные LER будут использовать протокол LDP для получения и хранения меток от выходного LER (LER4 в данном сценарии) вплоть до входного LER (LER1).

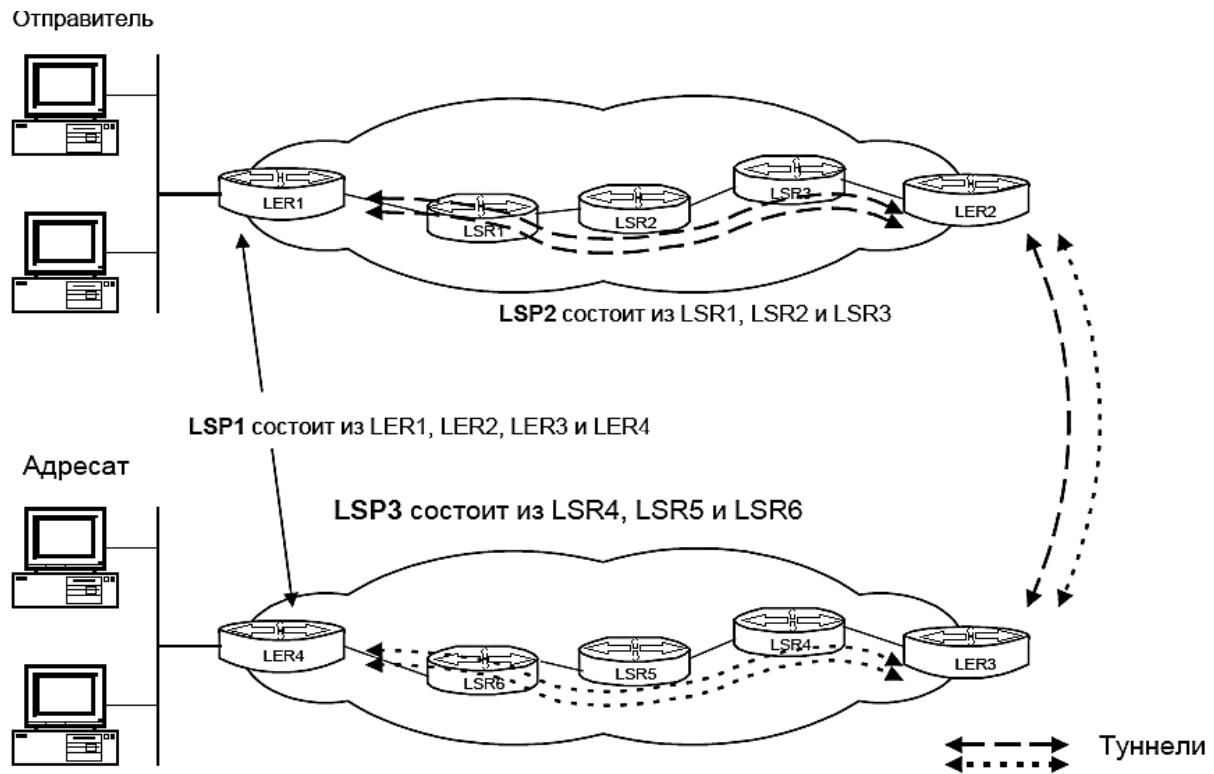


Рис. 1. Схема процесса туннелирования в MPLS

Чтобы данные были переданы от LER1 к LER2, они должны пройти через несколько (в данном случае три) транзитных маршрутизаторов LSR. Между двумя LER (LER1 и LER2) создается отдельный тракт LSP (LSP2), который охватывает LSR1, LSR2 и LSR3. Он представляет собой туннель между этими двумя LER. Метки в этом тракте отличаются от меток, которые LER создали для LSP1. Это справедливо и для LER3, LER4, и для LSR, находящихся между ними. Для этого последнего сегмента создается тракт LSP3. Для достижения этого результата при передаче пакета через два сетевых сегмента используется концепция стека меток. Пакет должен следовать через LSP1, LSP2 и LSP3, он будет переносить одновременно две отдельные метки.

Пары, используемые для каждого сегмента: для первого – метка для LSP1 и LSP2, для второго – метка для LSP1 и LSP3. Когда пакет покидает первую сеть и принимается пограничным маршрутизатором LER2, тот удаля-

ет метку для LSP2 и заменяет её на метку для LSP3, заменяя при этом метку LSP1 внутри пакета на метку следующей пересылки. LER4 удаляет обе метки перед отправкой пакета адресату.

2 Математическая модель эффекта туннелирования MPLS

Математическая модель эффекта туннелирования в MPLS [4, 5] представляет собой сеть массового обслуживания с последовательными очередями (рис. 2).

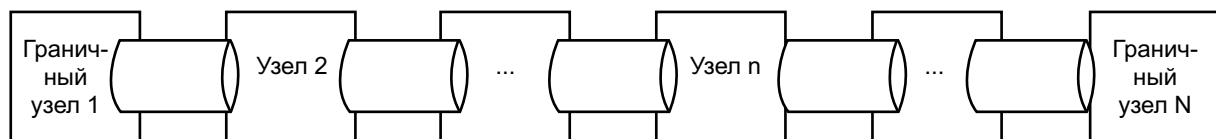


Рис. 2. Модель последовательных очередей

Оцениваемые параметры:

- среднее время обслуживания без прерывания (период занятости),
- среднее время пребывания пакета в n -м узле.

Обслуживаемые за период занятости (т. е. непрерывно, без освобождения) пакеты объединяются в группу на выходе узла и называются *пачкой*. Средняя длина такой пачки определяется числом пакетов. На вход граничного узла 1 поступает пуассоновский поток сообщений с интенсивностью входного потока заявок λ и средним временем обслуживания $1/\mu$.

Если рассматривать два следующих один за другим сообщения на узле n ($n \geq 2$), интервал времени между поступлением этих двух сообщений зависит от времен поступления и обслуживания на предыдущих узлах. Сообщения, сгруппированные на узле n ($n \geq 2$), остаются сгруппированными и на последующих узлах $n + 1$, $n + 2$.

В туннелировании существуют два явления: сцепление пачек, исходящих от первого узла, и фрагментация этих же пачек.

Первое явление – *сцепления* – относится не только ко второму, но и к любому не первому узлу n ($n \neq 1$) и связано с тем, первый пакет k -й пачки догоняет на этом узле последний пакет $(k - 1)$ -й пачки, и обе пачки – k -я и $(k - 1)$ -я – соответствующим образом сцепляются (рис. 3а).

Второе явление – *фрагментации* (рис. 3б) – не столь очевидно и имеет место только во втором узле, но тоже вполне наглядно. Пусть в первом узле обслуживается пакет номер j из пачки k и в этот момент на тот же первый узел поступает следующий пакет номер $j + 1$, время обслуживания которого

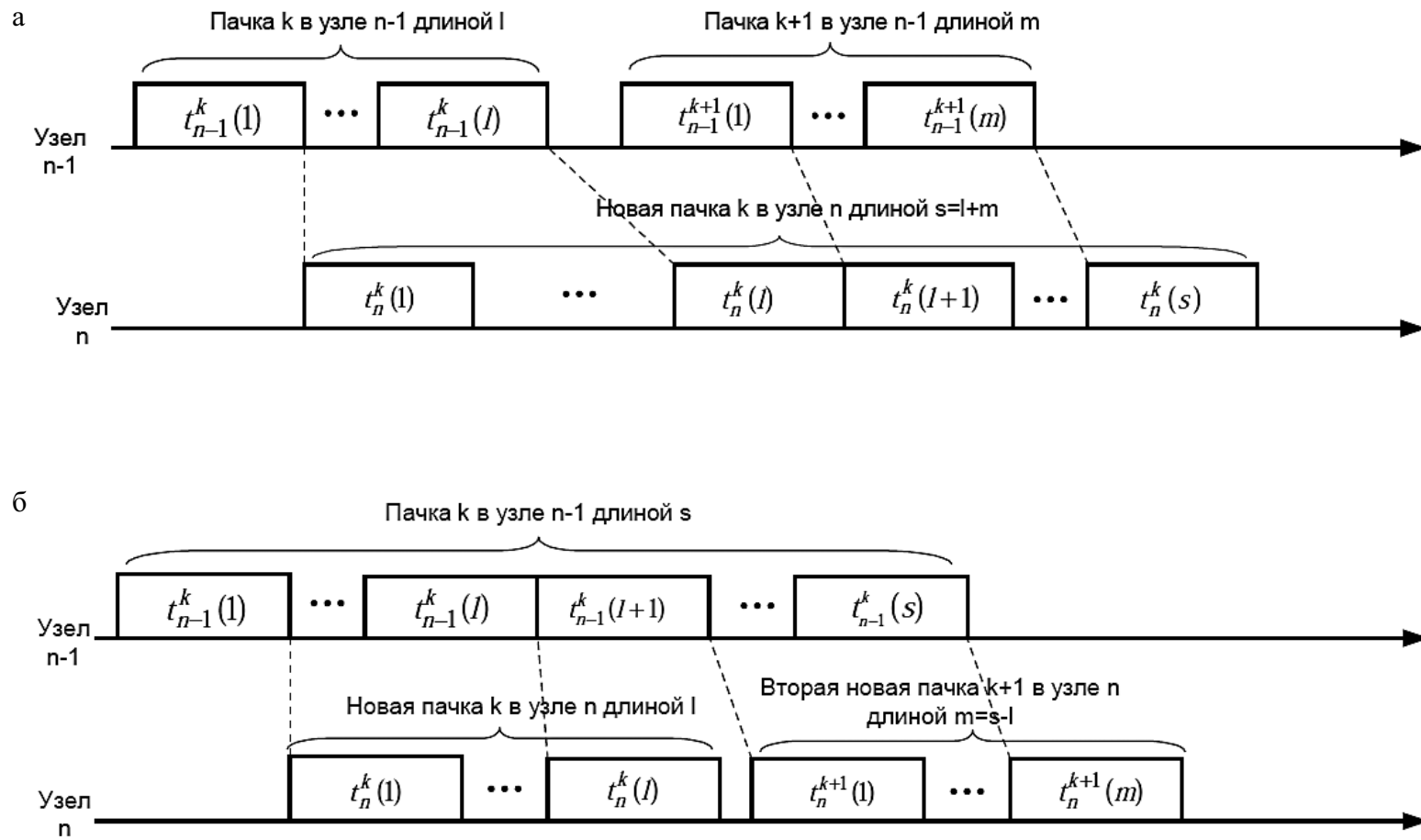


Рис. 3. Сцепление пачек $k-1$ и k в узле n (а) и фрагментация пачки k в узле n (б)

превышает время обслуживания пакета j . Пусть на следующем втором узле в этот момент нет очереди и пакет j обслуживается, как только он поступает на узел 2, пакеты $j + 1$ и j начинают обслуживаться одновременно на узлах 1 и 2, соответственно. Когда пакет j затем покидает узел 2, пакет $j + 1$ всё ещё продолжает обрабатываться на узле 1, поскольку время его обслуживания дольше.

Математический анализ этих двух явлений эффекта туннелирования MPLS позволяет применить следующую формулу для времени пребывания пакета в туннеле, состоящем из N узлов [2]:

$$V_1(N) \cong \frac{1}{\mu} \ln[(N-2)! \left(\frac{\rho}{1-\rho}\right)^N] + N(1+\gamma), \quad (1)$$

где γ – постоянная Эйлера ($\gamma \cong 0,577$), а $N > 2$; ρ – нагрузка сети.

Формула (1) позволяет оценить целесообразность организации туннеля в LSP-пути для индивидуальных пар «исходящий узел – узел назначения» при заданной нагрузке сети.

На рис. 4 представлен маршрут в MPLS-сети, который состоит из N узлов и физических каналов передачи данных между ними. Маршрут определяется местом расположения LSR_i (LSR источника), LSR_n (LSR назначения) и классом обслуживания трафика, определяемым допустимым временем передачи. Пусть λ – интенсивность пуассоновского потока запросов, а $1/\mu$ означает усредненное время обслуживания сообщений в узле. Соответственно, $\rho = \lambda/\mu$ означает нагрузку, обслуживаемую узлом LSP-маршрута. Обслуживание же этой нагрузки узлами, входящими в данный LSP-маршрут, и является основной работой данного фрагмента сети MPLS.

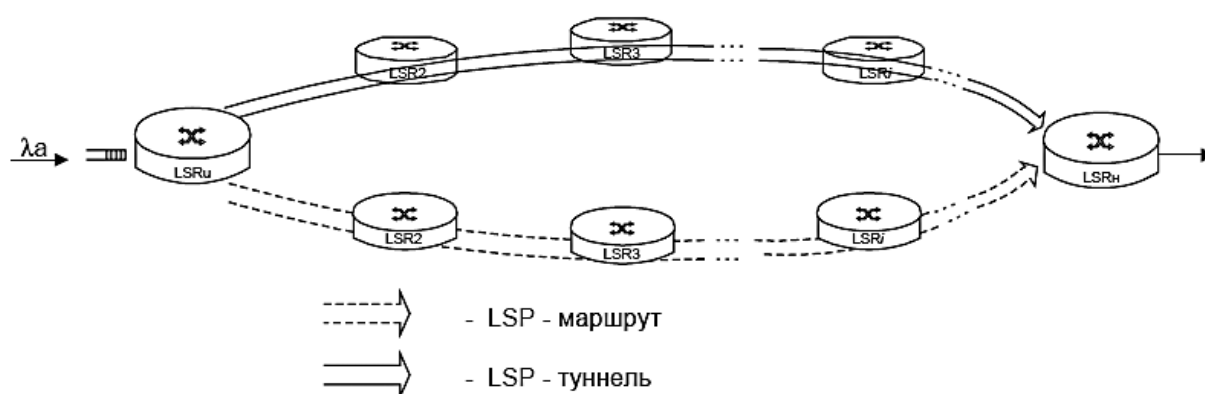


Рис. 4. Сравнительная оценка величин $V_1(N)$ и $V_2(N)$

В контексте поставленной задачи поиска стратегии принятия решения об организации LSP-туннеля для оценки альтернативного варианта суммар-

ного времени $V_2(N)$ пребывания пакета в LSP-пути без туннеля допустимо использовать формулу Эрланга в качестве адекватной оценки, позволяющей произвести сравнение с $V_1(N)$.

На рис. 4 представлены оба варианта передачи сообщений при наличии или в отсутствие LSP-туннеля. В первом случае суммарное время пребывания пакета в сети равно $V_1(N)$, а во втором случае время пребывания того же пакета в сети равно $V_2(N)$.

Для аналитического исследования ситуации отсутствия LSP-туннеля узел n , передающий пакеты по LSP, целесообразно описать с помощью модели M/M/1/K со скоростью передачи μ пакетов в секунду и максимальным числом K пакетов, которое он может хранить в своей буферной памяти. Пакеты в этой модели являются теми же самыми, что в случае организации туннеля, а ограничение на размер буфера выбрано так, чтобы условия в вариантах наличия или отсутствия туннеля были бы абсолютно одинаковы.

Инженерные различия между MPLS и традиционным туннелированием состоит в модели топологии MPLS. Традиционные туннели всегда проходят от одной границы до другой насквозь через сеть. В случае MPLS туннели могут создаваться внутри сети для управления трафиком только в части сети. То есть в LSP из M маршрутизаторов от входящего LSR1 до исходящего LSRM можно создать LSP-туннель, например, от входящего LSR5 до исходящего LSRN, при $N < M$. То есть даже создаваемые на короткое время LSP-туннели в MPLS могут начинаться внутри сети, а не из пользовательского приложения на границе сети. Это особенно важно для практического применения представленной в работе модели: пользователи будут продолжать применять обычные IP-пакеты и адресацию в своих приложениях и даже в локальных сетях. Однако в случае подключения локальной сети к глобальной некоторые IP-пакеты пользователей (или пакеты, относящиеся к другим протоколам) могут направляться через туннели MPLS в целях обеспечения их привилегированного обслуживания.

Эффект, получаемый от организации туннеля, выражается разностью между $V_1(N)$ и $V_2(N)$. Наличие этого эффекта проверяется начиная с максимально возможного значения $N = M$, т. е. с максимально длинного туннеля из конца в конец. Если при этом достигается положительный эффект, то принимается решение об организации туннеля. Если нет, то попытка поиска этого эффекта повторяется для более короткого пути $N = M - 1$.

3 Анализ целесообразности организации туннеля на сети передачи данных

Выбранный для анализа маршрут сети передачи данных, для которого будут проводиться вычисления, представлен на рис. 5 [6, 7].

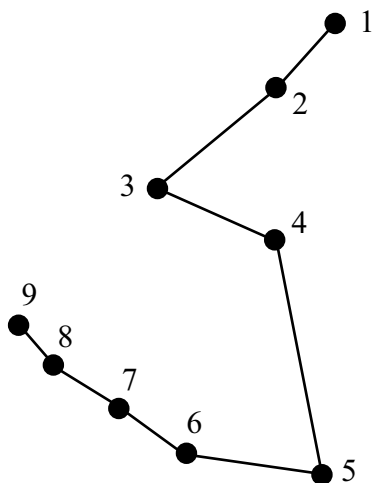


Рис. 5. Анализируемый маршрут сети передачи данных

Шаг 1. Полагается $N = M = 9$.

Шаг 2. Для $n = 1, 2, \dots, 9$ определим величину размера пачки K_n по формуле

$$K_n \approx 1 + n \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (2)$$

Результаты расчетов для различных величин загрузки ($\rho = 0,3-0,95$) сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета величины пачки пакетов K
в зависимости от длины маршрута n при $\rho = 0,3-0,95$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho = 0,3$									
K_n	1,4	1,9	2,3	2,7	3,1	3,6	4	4,4	4,9
$\rho = 0,5$									
K_n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\rho = 0,8$									
K_n	5	9	13	17	21	25	29	33	37
$\rho = 0,95$									
K_n	20	39	58	77	96	115	134	153	172

Шаг 3. Определим время $V_2(9)$ пребывания пакета в LSP-пути сети MPLS из 9 узлов (маршрутизаторов) без организации LSP-туннеля при наличии ограниченной очереди к узлу n длиной K_n по формуле

$$V_2(N) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{\mu} \frac{1 - (K_n + 1)\rho^{K_n} + K_n\rho^{K_n+1}}{(1 + \rho^{K_n})(1 - \rho)}. \quad (3)$$

В расчётах используем $\mu = 25\,000$ пак/с.

Результаты расчетов для $\rho = 0,3-0,95$ сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета времени пребывания пакета в LSP-пути без организации туннеля

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho = 0,3$									
$V_2(N)$	0,00009	0,00014	0,00019	0,00025	0,00030	0,00036	0,00041	0,00047	0,00053
$\rho = 0,5$									
$V_2(N)$	0,00011	0,00018	0,00025	0,00033	0,00041	0,00049	0,00057	0,00065	0,00073
$\rho = 0,8$									
$V_2(N)$	0,00024	0,00041	0,00060	0,00079	0,00098	0,00118	0,00138	0,00158	0,00178
$\rho = 0,95$									
$V_2(N)$	0,00090	0,00158	0,00232	0,00309	0,00388	0,00467	0,00547	0,00627	0,00707

Шаг 4. Определим время пребывания пакета в LSP-туннеле $V_1(N)$ из n узлов по формуле (1).

Результаты расчетов для $\rho = 0,3-0,95$ сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов времени пребывания пакета в LSP-пути с организацией туннеля

n	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho = 0,3$								
$V_1(N)$	0,00005	0,00008	0,00014	0,00021	0,00030	0,00039	0,00049	0,00060
$\rho = 0,5$								
$V_1(N)$	0,000126	0,000189	0,000280	0,000387	0,000505	0,000633	0,000767	0,000908
$\rho = 0,8$								
$V_1(N)$	0,000237	0,000355	0,000501	0,000664	0,000838	0,001021	0,001211	0,001407
$\rho = 0,95$								
$V_1(N)$	0,0003617	0,0005426	0,0007512	0,0009760	0,0012123	0,0014575	0,0017100	0,0019687

Шаг 5. Сравним величины $V_1(N)$ и $V_2(N)$. При их положительной разнице организация туннеля между первым узлом и узлом n нецелесообразна. При этом осуществляется переход к шагу 6. В противном случае принимается решение организовать туннель между первым узлом и узлом n , и работа алгоритма завершается.

Шаг 6. При положительной разнице $V_1(N)$ и $V_2(N)$ в узле n принимается решение об исключении узла n из рассмотрения на предмет возможного LSP-туннеля. Выполняется анализ равенства N числу 3. Если $N = 3$, то принимается решение об отказе в организации LSP-туннеля где бы то ни было вдоль LSP-маршрута и работа алгоритма завершается. В противном случае, т. е. при $N > 3$, присваивается $N = N - 1$ и происходит возврат к шагу 2.

Выигрыш во времени от организации туннеля равен разности V_1 и V_2 . Нагрузка на LSP – $\rho = 0,3; 0,5; 0,8; 0,95$. Результаты расчетов представлены на рис. 6–9.

На рис. 6 видно, что время пребывания пакета в сети передачи данных с организацией туннеля (V_1) на начальном этапе меньше, чем время прохождения пакета по сети без организации туннеля (V_2). Но после прохождения пакетом пятого узла V_1 время начинает существенно увеличиваться, тогда как время прохождения пакета по сети без организации туннеля (V_2) возрастает более плавно. То есть после пятого узла пакет в сети с организацией туннеля будет обрабатываться медленнее, чем в сети без организации туннеля. Это происходит из-за сцепления пачек сообщений. Следовательно, организация туннеля при нагрузке сети $\rho = 0,3$ и средней скорости обслуживания 25 000 пак/с будет эффективна на сети, состоящей из пяти узлов.

По рис. 7 можно отметить, что время пребывания пакета в сети передачи данных с организацией туннеля (V_1) и без организации туннеля (V_2) до прохождения пакетом второго узла различаются несущественно, но после прохождения пакетом второго узла время пребывания пакета в сети передачи

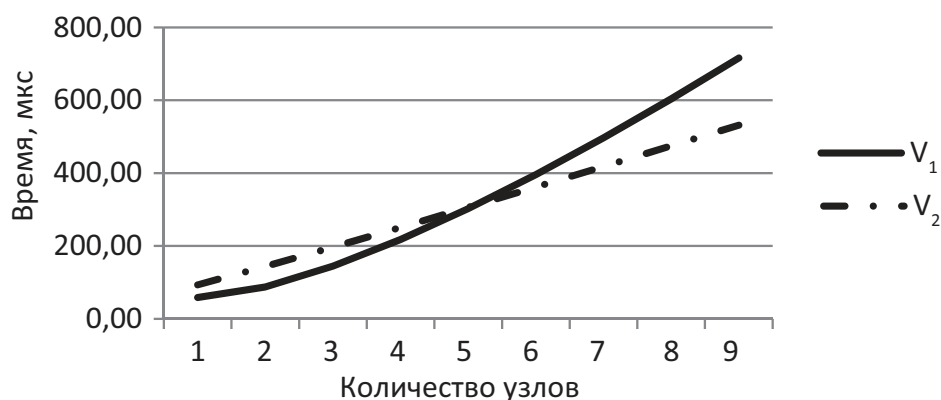


Рис. 6. График зависимости времени пребывания пакета в LSP-пути при организации туннеля и без организации туннеля от количества узлов при $\rho = 0,3$

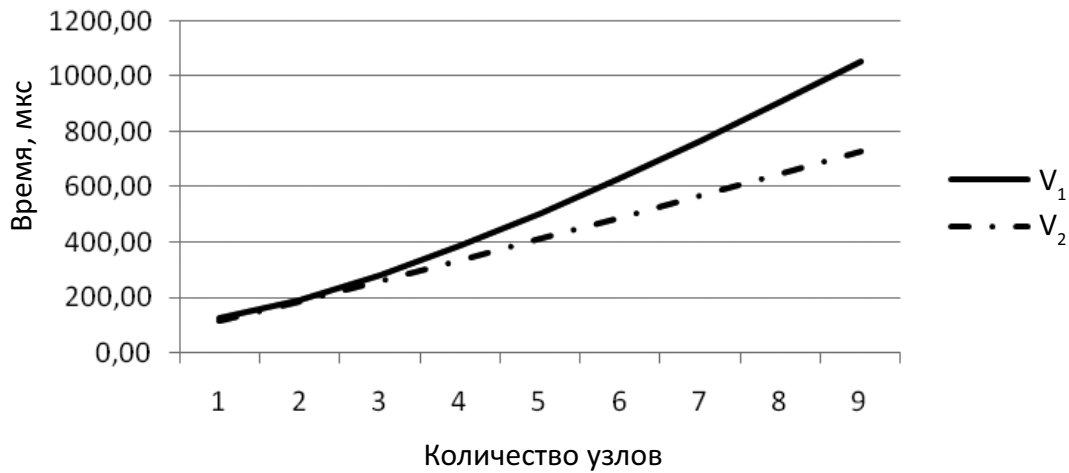


Рис. 7. График зависимости времени пребывания пакета в LSP-пути при организации туннеля и без организации туннеля от количества узлов при $\rho = 0,5$

данных с организацией туннеля (V_1) начинает резко возрастать, тогда как без организации туннеля (V_2) увеличивается более плавно. То есть после второго узла пакет в сети с организацией туннеля будет обрабатываться медленнее, чем в сети без организации туннеля. Следовательно, организация туннеля при загрузке сети $\rho = 0,5$ и при среднем времени обслуживания 25 000 пак/с будет эффективна на сети из двух узлов.

На рис. 8 и 9 видно, что время пребывания пакета в сети передачи данных с организацией туннеля (V_1) существенно ниже и увеличивается медленнее, чем время прохождения пакета по сети без организации туннеля (V_2). Следовательно, организация туннеля при нагрузке сети $\rho = 0,8; 0,95$ и средней скорости обслуживания 25 000 пак/с будет эффективна на всей сети.

После анализа рисунков 6 и 7 можно сделать вывод, что при $\rho = 0,3$ эффективна организация туннеля при $N \leq 5$, при $\rho = 0,5$ – при $N \leq 2$, а при

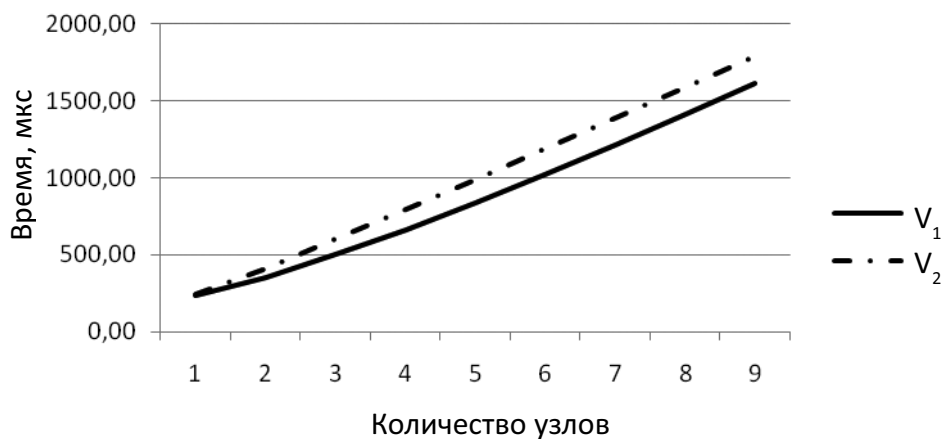


Рис. 8. График зависимости времени пребывания пакета в LSP-пути при организации туннеля и без организации туннеля от количества узлов при $\rho = 0,8$

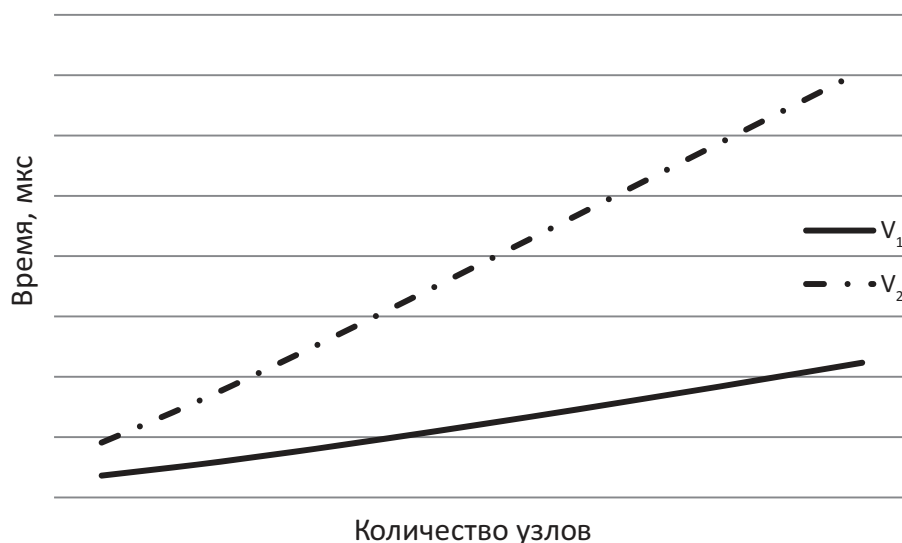


Рис. 9. График зависимости времени пребывания пакета в LSP-пути при организации туннеля и без организации туннеля от количества узлов при $\rho = 0,95$

$\rho = 0,8$ и $\rho = 0,95$ эффективна организация туннеля во всем LSP-пути, т. е. при $N \leq 9$.

Рассчитаем выигрыш во времени при применении технологии MPLS при разном количестве узлов и определим зависимость выигрыша во времени от количества узлов (%).

Результаты расчетов для $\rho = 0,3-0,95$ сведены в табл. 4 и представлены на рис. 10.

Таблица 4

Результаты расчетов выигрыша во времени при применении технологии MPLS при разном количестве узлов, %

<i>n</i>								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\rho = 0,3$								
37,18	39,12	26,54	13,26	1,251	-9,36	-18,76	-27,15	-34,71
$\rho = 0,5$								
-8,58	-2,00	-8,10	-15,45	-22,40	-28,72	-34,44	-39,65	-44,42
$\rho = 0,8$								
3,91	14,62	16,47	16,22	15,25	13,99	12,63	11,25	9,88
$\rho = 0,95$								
60,20	65,75	67,67	68,47	68,78	68,84	68,77	68,62	68,43

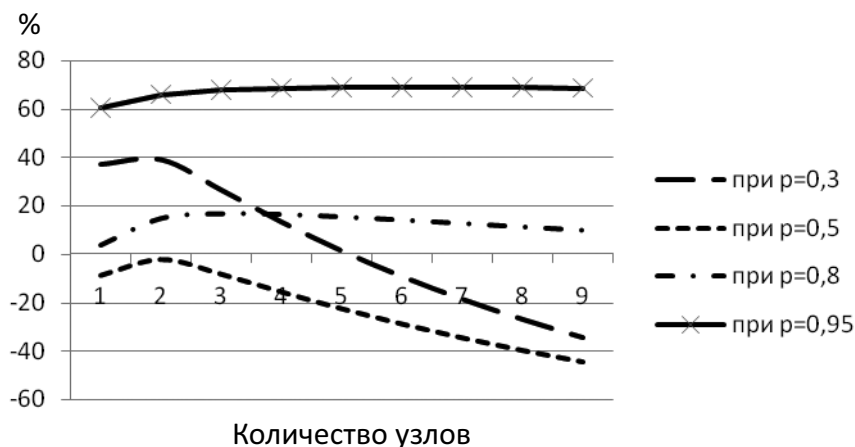


Рис. 10. График зависимости выигрыша во времени при применении технологии MPLS от количества узлов при различных нагрузках

Таким образом, эффективность применения технологии MPLS при различных нагрузках зависит от количества узлов. Чем больше узлов (маршрутизаторов), тем быстрее обслуживается нагрузка. Так, при нагрузке $\rho = 0,3$ наибольшая эффективность достигается при двух узлах; при $\rho = 0,5$ применение технологии неэффективно; при $\rho = 0,8$ наибольшая эффективность от применения данной технологии при $n = 3$, а при $\rho = 0,95$ – при шести узлах.

Посмотрим, как время пребывания пакета в LSP-туннеле (V_1) будет зависеть от изменения нагрузки (ρ) при неизменном количестве узлов (N).

Результаты расчетов представлены в табл. 5 и на рис. 11.

Таблица 5

Результаты расчетов времени пребывания пакета в LSP-туннеле в зависимости от изменения нагрузки при различном количестве узлов

Количество узлов, N	Загрузка, ρ	Время пребывания пакета в LSP-туннеле, V_1 (мкс)
1	0,3	58,38
	0,5	126,16
	0,8	237,06
	0,95	361,72
2	0,3	87,56
	0,3	87,56
	0,5	189,24
	0,8	355,60
	0,95	542,57

Количество узлов, N	Загрузка, ρ	Время пребывания пакета в LSP-туннеле, V_1 (мкс)
3	0,3	144,48
	0,5	280,05
	0,8	501,85
	0,95	751,16
4	0,3	217,61
	0,5	387,07
	0,8	664,33
	0,95	975,96
5	0,3	302,25
	0,5	505,60
	0,8	838,31
	0,95	1212,27
6	0,3	395,82
	0,5	633,06
	0,8	1021,22
	0,95	1457,50
7	0,3	496,67
	0,5	767,81
	0,8	1211,42
	0,95	1710,03
8	0,3	603,70
	0,5	908,73
	0,8	1407,79
	0,95	1968,72
9	0,3	716,06
	0,5	1054,98
	0,8	1609,50
	0,95	2232,76

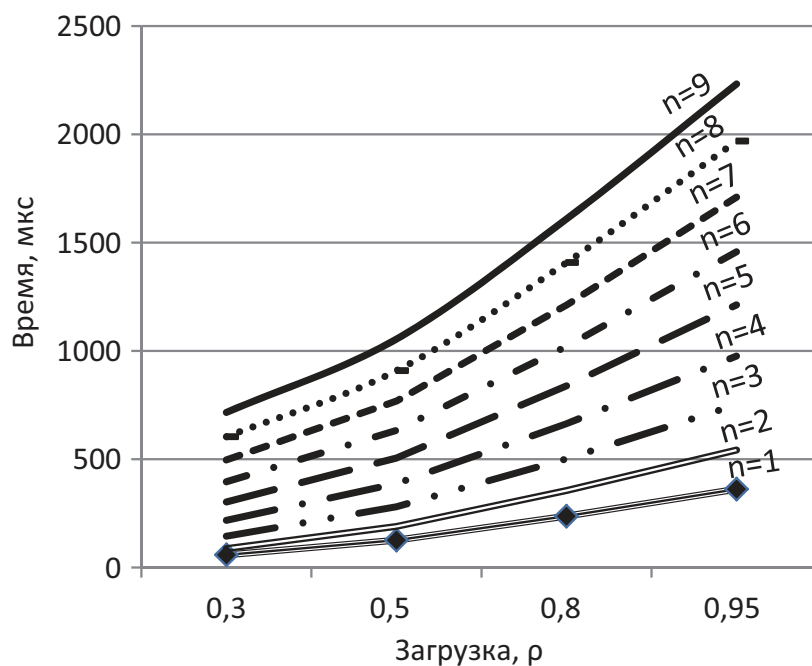


Рис. 11. График зависимости времени пребывания пакета в LSP-туннеле от изменения загрузки при различном количестве узлов

Как видно, с увеличением нагрузки при неизменном количестве узлов время пребывания пакета в туннеле возрастает, так как возрастает нагрузка, обслуживаемая каждым узлом, а следовательно, и суммарное время пребывания пакета в туннеле.

Заключение

В статье предпринята попытка оценить эффективность организации туннеля в сети MPLS на примерах расчёта временных характеристик обслуживания трафика в сетях с реальной пропускной способностью.

Библиографический список

1. **MPLS** : новый регулировщик движения на сетевых магистралях / Д. Вудс. – URL : http://ccc.ru/magazine/depot/01_03/0303.htm.
2. **Эволюция** транспортных технологий / А. Б. Гольдштейн. – URL : <http://niits.ru/public/2000s/>.
3. **Виртуальные** частные сети на основе MPLS / Н. Олифер, В. Олифер. – URL : http://www.olifer.co.uk/articles/mpls_1/mpls_1/html.

4. **Технология** и протоколы MPLS / А. Б. Гольдштейн. – СПб. : БХВ-Санкт-Петербург, 2005. – 304 с.

5. **Механизм** эффективного туннелирования в сети MPLS / А. Б. Гольдштейн. – URL : <http://niits.ru./thtmes/mpls/>.

6. **MPLS**-технология маршрутизации для нового поколения сетей общего пользования / Б. Л. Сатовский. – URL : <http://athena.vvsu.ru/docs/tcpip/mpls/>.

7. **Сети VPN** на базе MPLS/В. Ткаченко. – URL : <http://www.lessons-tva.info/archive/nov030.htmIMPLS.ru/nets/>, 2012.